中国生态农业学报 2017 年 9 月 第 25 卷 第 9 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Sep. 2017, 25(9): 1326−1334

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170083

刘文彬, 冯乃杰, 张盼盼, 李东, 张洪鹏, 何天明, 赵晶晶, 徐延辉, 王畅. 乙烯利和激动素对玉米茎秆抗倒伏和产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(9): 1326−1334

Liu W B, Feng N J, Zhang P P, Li D, Zhang H P, He T M, Zhao J J, Xu Y H, Wang C. Effects of ethephon and kinetin on lodging-resistance and yield of maize[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(9): 1326−1334

乙烯利和激动素对玉米茎秆抗倒伏和产量的影响*

刘文彬, 冯乃杰**, 张盼盼, 李 东, 张洪鹏, 何天明,
赵晶晶, 徐延辉, 王 畅

(黑龙江八一农垦大学农学院 大庆 163319)

摘 要: 倒伏是影响玉米产量的主要原因之一, 为了探明不同时期喷施不同生长调节剂对玉米抗倒伏性和产量的影响, 选用玉米品种'德美亚 1 号'和'德美亚 2 号'为试验材料, 在 5、7、9 展叶期分别喷施乙烯利(ETH)和激动素(KT), 以喷施清水为对照, 测定灌浆期基部茎秆形态、力学、化学组分及成熟后的倒伏率和产量。结果表明, 与对照相比, '德美亚 1 号'5 展叶期喷施 KT, 节间直径显著增加 21.11%, 节间密度增加 13.23%; 与对照相比, '德美亚 2 号'7 展叶期喷施 ETH, 使基部节间总长度显著降低 14.41%, 节间直径显著增加 10.70%, 节间密度显著增加 15.46%。'德美亚 1 号'和'德美亚 2 号'7 展叶期喷施 ETH, 分别与对照相比, 折断力显著增加 26.04%和 16.77%, 穿刺强度显著增加 22.77%和 14.62%。'德美亚 2 号'9 展叶期喷施 ETH, 节间半纤维素、纤维素和木质素组成的化学组分总含量比对照显著增加 25.49%。KT 对两个品种茎秆力学影响表现不同, ETH 对两个品种茎秆力学调控效果优于 KT 处理。两种调节剂处理均降低了两种玉米收获期的倒伏率。节间直径与折断力呈极显著正相关(r=0.905**), 节间化学组分总含量和节间直径与倒伏率呈显著或极显著负相关。两个品种 9 展叶期喷施 KT, 产量比对照极显著增加 22.24%和 19.98%, 喷施 ETH 对产量影响不显著。综上, KT 于两个品种 9 展叶期喷施可显著增加产量, ETH 于两个品种 7 展叶期喷施对抗倒伏性调控效果较好。

关键词: 乙烯利; 激动素; 玉米; 茎秆形态; 茎秆力学特性; 抗倒性; 产量
中图分类号: S312 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2017)09-1326-09

Effects of ethephon and kinetin on lodging-resistance and yield of maize*

LIU Wenbin, FENG Naijie**, ZHANG Panpan, LI Dong, ZHANG Hongpeng,
HE Tianming, ZHAO Jingjing, XU Yanhui, WANG Chang

(College of Agronomy, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China)

Abstract: Lodging is one of the major factors affecting yield of maize. To determine the effect of plant growth regulator application dates on lodging-resistance and yield of maize, the foliage of 'Demeiya-1' and 'Demeiya-2' were sprayed with 400 mg·L^{-1} ethephon (ETH), 10 mg·L^{-1} kinetin (KT) and fresh water (CK) at the 5-, 7- and 9-leaf stages, respectively. Then stem morphology, mechanical indicators, chemical properties, lodging rates at filling stage and grain yield of maize were determined. The results showed that compared with CK, KT treatment at 5-leaf stage increased internode diameter by 21.11% and

* 国家"十二五"科技支撑计划项目(2012BAD20B04)和黑龙江农垦总局科技攻关项目(HNK12A-06-03, HNK12A-09-02)资助
** 通讯作者: 冯乃杰, 主要研究方向为作物化学控制与技术。E-mail: dqfnj@126.com
刘文彬, 研究方向为作物化学控制与技术。E-mail: 137540804@qq.com
收稿日期: 2017-01-23 接受日期: 2017-03-23
* This study was supported by the National Key Technologies R & D Program of China (2012BAD20B04) and the Province Farms Reclamation Bureau Key Technologies R & D Program of Heilongjiang (HNK12A-06-03, HNK12A-09-02).
** Corresponding author, E-mail: dqfnj@126.com
Received Jan. 23, 2017; accepted Mar. 23, 2017

internode density by 13.23% in ‘Demeiya-1’ maize variety. Also ETH treatment at 7-leaf stage reduced the total length of basal internode by 14.41%, but then increased internode diameter by 10.70% and internode density by 15.46% in ‘Demeiya-2’ maize variety. ETH treatment at 7-leaf stage increased the break strength of internode by 26.04% and 16.77%, and internode penetration strength by 22.77% and 14.62% respectively in ‘Demeiya-1’ and ‘Demeiya-2’ maize varieties. The contents of hemicellulose, cellulose and lignin in internode of ‘Demeiya-2’ increased by 25.49% under ETH treatment at 9-leaf stage. The effect of ETH on mechanics of maize stalks regulation were better than that of KT, although the two plant growth regulators all reduced lodging rate of both maize cultivars. There was a highly significant positive correlation between internode diameter and break strength ($r = 0.905^{**}$), but significant or extremely significant negative correlation was noted between lodging rate and chemical compositions contents or internode diameter of internode. KT application at 9-leaf stage significantly increased grain yield of ‘Demeiya-1’ (22.24%) and ‘Demeiya-2’ (19.98%), while ETH treatment had no significant effects on maize yield. Based on the results therefore, KT treatment at 9-leaf stage significantly increased maize yield, but lodging-resistance under ETH treatment at 7-leaf stage was better than that under KT.

Keywords: Ethephon; Kinetin; Maize; Stem morphology; Mechanics of crop stalk; Lodging-resistance; Yield

黑龙江是玉米生产第一大省。由于土壤条件、耕作方式、栽培管理和种植密度等因素，导致玉米植株过高，茎秆纤细，抗倒伏能力差，直接影响其收获产量和经济价值[1-5]。玉米倒伏分为根倒、茎倒和根茎混合倒伏[6-7]，茎倒比根倒危害更大[8]，茎节倒折后，影响地上和地下物质交换和光合产物向库的运输，同时破坏了原有的群体结构，影响叶片光合作用，叶片面积变小，灌浆效率下降，穗长、穗粒数变小，百粒重和生物学产量降低[4-5]。株高和穗位与倒伏呈显著正相关，株高和穗位越高越容易倒伏[9]。Martin等[10]研究指出玉米抗倒伏性与基部茎节直径有关，其中基部第3节直径与倒伏性呈显著负相关，基部第3节越粗抗倒伏能力越强。姚敏娜等[11]在种植密度对玉米茎秆影响试验中表明，基部节间皮层结构(机械组织厚度、机械细胞层数、皮层厚度/半径)与节间直径具有显著正相关，与节间长度和田间倒伏率呈负相关。刘卫星等[12]对13个玉米品种进行茎秆力学分析时发现，抗倒伏性强的品种在基部第3、4、5节的茎秆压碎强度、穿刺强度和折断力度均高于抗倒伏弱的品种，基部茎秆力学特征与倒伏率呈显著或极显著负相关。勾玲等[13]研究表明，茎秆抗倒力学性状与农艺性状密切相关，节间干物质积累、尤其高位节间的干物质积累较高的品种抗倒伏能力强，茎节密度(干物质/单位茎长)对茎秆压碎强度和外皮穿刺强度的正向影响最大。Wang等[14]进行10个玉米品种的回归分析得出，影响抗折力的主要因素是皮层厚度/半径、机械组织比例、维管束、纤维素和木质素含量，影响穿刺强度的主要因素是纤维素、木质素含量和单位面积上维管束数量。

植物生长调节剂广泛应用于玉米抗倒伏中，但调节剂的施用条件(包括浓度、处理时期和外界环境)较为严格。目前黑龙江种植面积较大的玉米品种为‘德美亚1号’和‘德美亚2号’，但对其抗倒伏调节剂的研究尚少有报道。乙烯利为乙烯释放剂，可减少植物微管的横向排列，增加了微管的纵向排列，微管纵向排列相应地增加了微纤丝的纵向沉积，限制细胞纵向扩张的幅度，这有利于膨压推动的细胞扩张生长向横向进行[15]，但使用不当会造成减产[16-17]。激动素是非天然的细胞分裂素，激动素处理后作物株高提高、穗位节增粗、叶绿素含量增加[18]，有延缓作物衰老的作用，但在抗倒伏方面研究少有报道。本研究在黑龙江九三农场易发生狂风暴雨的8月份，同时为玉米灌浆期，选用常见的两种类型植物调节剂乙烯利和激动素，探究5、7、9展叶期喷施调节剂对玉米茎秆农艺性状、力学特性和化学组分的影响，旨在为黑龙江玉米抗倒伏调节剂的研制与应用提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　材料与设计

供试玉米品种‘德美亚 1 号’和‘德美亚 2 号’，为当地主栽品种，穗位节一般在基部第 6 节和第 7 节。试验于 2015 年在黑龙江农垦九三管理局进行，种植土壤类型为黑钙土，0~20 cm 耕层土壤碱解氮含量 266 mg·kg^{-1}，有效磷含量 38.1 mg·kg^{-1}，速效钾含量 183 mg·kg^{-1}，有机质含量 55.1 g·kg^{-1}，pH 6.25。于 5 月 20 日播种，种植密度为 9 万株·hm^{-2}，大垄双行种植，垄宽 1.1 m，小区宽 4.4 m、长 10 m，处理和对照各设 4 次重复，共计 72 个小区，并随机排列，田间管理同当地大田管理。于玉米 5、7、9 展叶期喷施乙烯利(ETH，浓度 400 mg·L^{-1})和激动素(KT，浓度 10 mg·L^{-1})，同时喷施清水为对照，喷施量 225 L·hm^{-2}，乙烯利和激动素所选用的浓度均经过黑龙江八一农垦

大学化控实验室筛选，喷施时为减少液滴漂移到相邻小区，小区间用塑料布间隔。

1.2　测定项目和方法

于玉米籽粒灌浆期(9 展叶期喷施调节剂后第 20 d)，选取每个小区代表性植株 4 株，剥去叶鞘和叶片，用卷尺测量基部 5 节节间长度，游标卡尺测量节间直径；使用石家庄世亚科技 SY-S03 型植物茎秆强度测定仪测量基部第 3、4、5 节节间折断力(两个支点距离 15 cm)和节间穿刺强度(探头 1 mm^2)；测定后的植物茎节分段，105 ℃下杀青 30 min 后 80 ℃烘干至恒重称重，选取基部第 3 节粉碎过筛(0.25 mm)保存；用范式洗涤法测定半纤维素、纤维素和木质素含量[19]。收获期时测产，并查看连续 50 株的倒伏情况，产量含水量折合为 14%。

1.3　数据分析与处理

运用 Microsoft Excel 2013 进行数据计算与制图；应用 SPSS 21 软件对数据差异显著性进行分析。

2　结果与分析

2.1　植物生长调节剂对玉米基部节间长度的影响

基部节间长度是玉米植株重要的农艺指标。图 1 表明，与对照相比，5、7 和 9 展叶期喷施激动素处理‘德美亚 1 号’和‘德美亚 2 号’品种，基部节间总长度无显著变化；其中‘德美亚 2 号’9 展叶期喷施激动素基部第 4 节比对照增加达到显著性水平。7 展叶期喷施乙烯利，‘德美亚 1 号’和‘德美亚 2 号’品种基部节间总长度比对照显著缩短；与对照相比，处理第 1~5 节间‘德美亚 1 号’分别缩短 12.50%、10.81%、6.12%、15.90%和 37.93%，‘德美亚 2 号’分别缩短 21.88%、18.25%、6.25%、11.36%和 19.23%。5 展叶期和 9 展叶期喷施乙烯利，‘德美亚 1 号’和‘德美亚 2 号’基部节间总长度与对照无显著性差异。两个玉米品种 7 展叶期喷施乙烯利，基部第 4、5 节间长度比对照显著降低，基部节间长度缩短可以降低重心高和株高，从而增加玉米抗倒伏性。

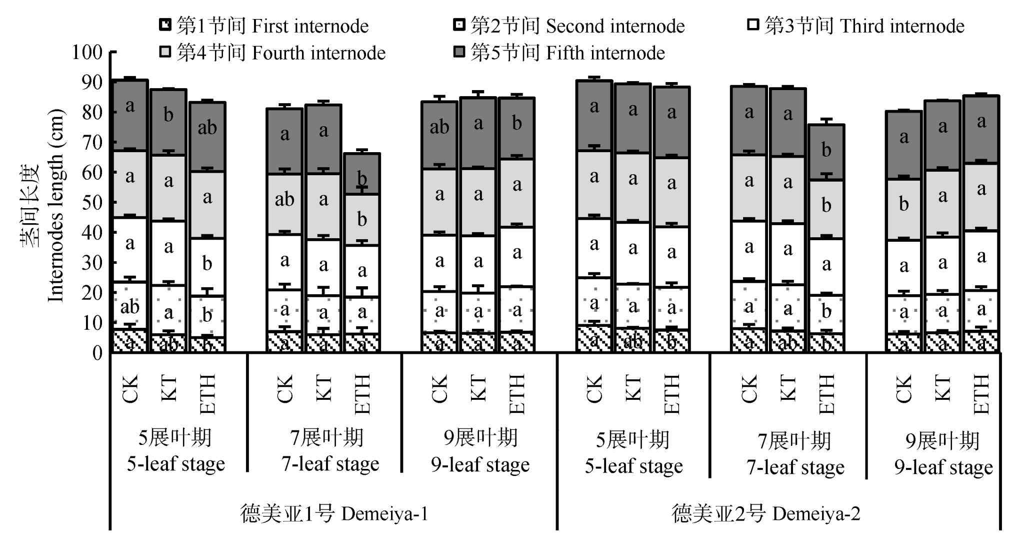


图 1　不同时期喷施植物生长调节剂对不同玉米品种籽粒灌浆期基部节间长度的影响

Fig. 1　Effects of plant growth regulators sprayed at different times on internode lengthes of different maize varieties at grain filling stage

CK：喷清水对照；KT：喷施 10 mg·L^{-1} 激动素；ETH：喷施 40 mg·L^{-1} 乙烯利。不同小写字母表示同一品种同一处理时期不同处理间在 0.05 水平差异显著。CK: spraying fresh water; KT: spraying 10 mg·L^{-1} kinetin; ETH: spraying 40 mg·L^{-1} ethephon. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments spraying at the same time for the same variety at 0.05 level.

2.2　植物生长调节剂对玉米基部节间直径的影响

节间直径与倒伏率显著负相关，节间直径越大抗倒伏能力越强。由图 2 可以看出，喷施乙烯利和激动素后两个品种基部各节位直径均增加。与对照相比，‘德美亚 1 号’激动素处理 5 展叶期第 1~5 节间直径显著增加 21.45%、24.79%、25.86%、19.65%和 13.78%；7、9 展叶期处理与对照差异不显著。与对照相比，‘德美亚 2 号’激动素喷施后基部节间直径平均值 5、7、9 展叶期处理增加 6.83%、6.20%和 8.61%。与对照相比，‘德美亚 1 号’乙烯利处理 5、7 展叶期处理节间直径平均值比对照增加 6.68%和 5.54%，9 展叶期处理后基部第 1~5 节比对照显著增加 9.74%、9.46%、12.17%、10.09%和 9.29%。乙烯利喷施于‘德美亚 2 号’后，7 展叶期处理基部第 1~5 节比对照显著增加 10.96%、11.41%、11.71%、9.71%和 9.71%，5 和 9 展叶期处理节间直径平均值比对照增加 4.74%

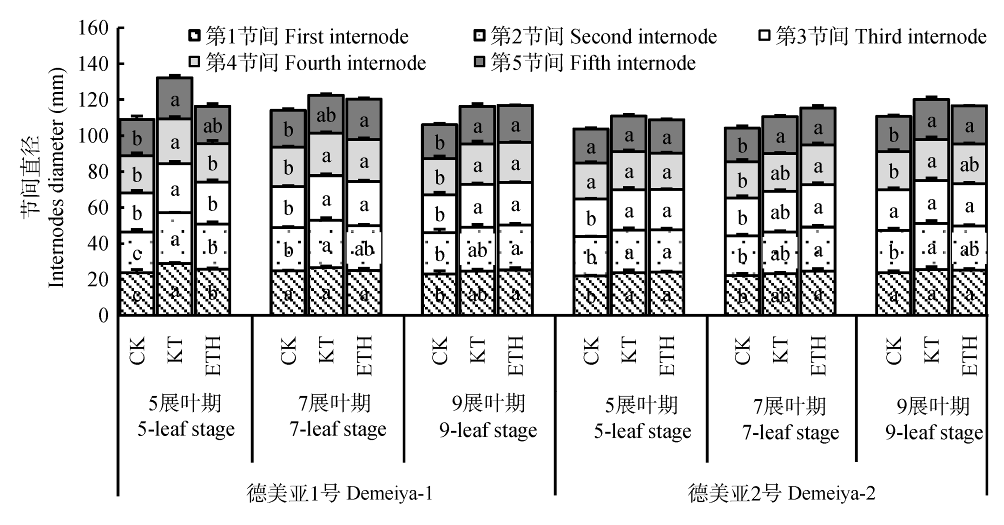


图 2　不同时期喷施植物生长调节剂对不同玉米品种籽粒灌浆期节间直径的影响

Fig. 2　Effects of plant growth regulators sprayed at different times on internode diameters of different maize varieties at grain filling stage

CK: 喷清水对照; KT: 喷施 10 mg·L^{-1} 激动素; ETH: 喷施 40 mg·L^{-1} 乙烯利。不同小写字母表示同一品种同一处理时期不同处理间在 0.05 水平差异显著。CK: spraying fresh water; KT: spraying 10 mg·L^{-1} kinetin; ETH: spraying 40 mg·L^{-1} ethephon. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments spraying at the same time for the same variety at 0.05 level.

和 5.52%。对‘德美亚 1 号’5 展叶期喷施激动素和对‘德美亚 2 号’7 展叶期喷施乙烯利对节间直径调控效果优于同品种其他处理，基部节间直径的增加使茎倒伏几率减少，从而增加抗倒伏能力。

2.3　植物生长调节剂对基部节间密度的影响

节间密度是指节间干物质重/节间长度，即单位节间长度干物质重。由图 3 看出，与对照相比，3 展叶期喷施激动素和 7、9 展叶期喷施乙烯利‘德美亚 1 号’和‘德美亚 2 号’节间密度增加。激动素喷施于‘德美亚 1 号’5、7、9 展叶期后节间密度平均值分别比对照增加 13.23%、8.26%和 5.97%。与对照相比，‘德美亚 2 号’喷施激动素后节间密度平均值 5 和 7 展叶期处理分别显著增加 22.66%和 23.36%，9 展叶期处理第 5 节增加 30.47%。‘德美亚 1 号’5 和 9 展叶期喷施乙烯利后，节间密度平均值与对照无显著差异，7 展叶期处理第 3、4 节显著增加 25.48%、68.67%。‘德美亚 2 号’喷施乙烯利后，7 和 9 展叶期处理节间密度平均值分别比对照增加 15.46%和 16.70%，5 展叶期处理比

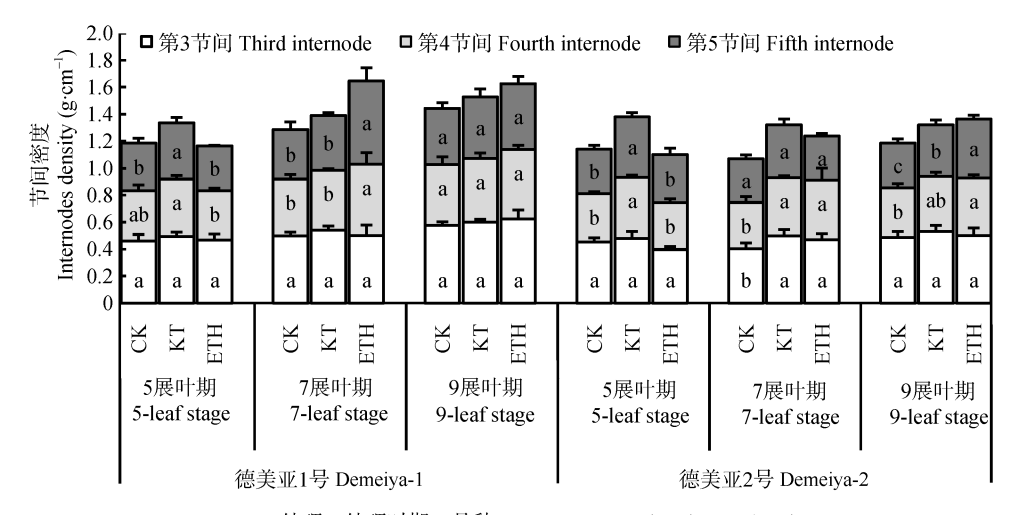


图 3　不同时期喷施植物生长调节剂对不同玉米品种籽粒灌浆期节间密度的影响

Fig. 3　Effects of plant growth regulators sprayed at different times on internode densities of different maize varieties at grain filling stage

CK: 喷清水对照; KT: 喷施 10 mg·L^{-1} 激动素; ETH: 喷施 40 mg·L^{-1} 乙烯利。不同小写字母表示同一品种同一处理时期不同处理间在 0.05 水平差异显著。CK: spraying fresh water; KT: spraying 10 mg·L^{-1} kinetin; ETH: spraying 40 mg·L^{-1} ethephon. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments spraying at the same time for the same variety at 0.05 level.

对照降低并未达显著水平。‘德美亚 1 号’7 展叶期喷施乙烯利处理和‘德美亚 2 号’5、7 展叶期喷施激动素处理对基部节间密度调控效果优于同品种其他处理，节间密度越大，茎秆机械强度越大。

2.4　植物生长调节剂对基部节间折断力的影响

节间折断力是茎节在一个固定距离的两个支点上，中点位置施加一个可以刚好使节间折断的力的大小。图 4 表明，与对照相比，激动素处理后节间折断力平均值 5 和 7 展叶期处理显著增加 38.38%和 24.08%，9 展叶期处理增加 7.45%且未达显著水平。激动素喷施于‘德美亚 2 号’后，5、7、9 展叶期处理节间折断力平均值比对照增加 5.96%、5.54%和 5.32%，并未达显著水平。‘德美亚 1 号’和‘德美亚 2 号’7 展叶期喷施乙烯利对基部节间折断力调控效果优于其他展叶期乙烯利处理，节间折断力平均值分别比对照增加 26.04%和 16.77%，其中‘德美亚 1 号’第 3~5 节比对照增加 17.65%、24.73%和 35.74%，‘德美亚 2 号’第 3~5 节增加 20.36%、8.21%和 21.74%；两个品种乙烯利其他展叶期处理与对照差异不显著。节间折断力越大，茎秆机械性能越好。

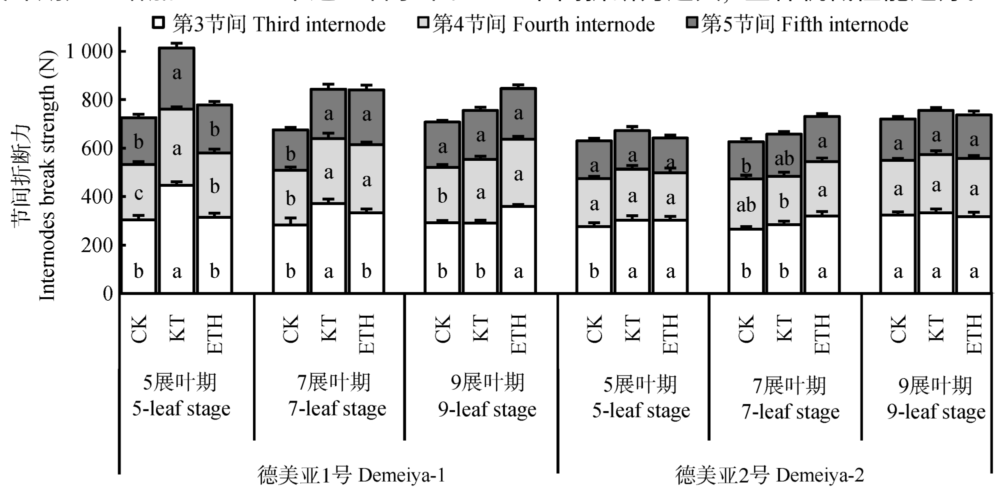


图 4　不同时期喷施植物生长调节剂对不同玉米品种籽粒灌浆期节间折断力的影响

Fig. 4　Effects of plant growth regulators sprayed at different times on internode break strengths of different maize varieties at grain filling stage

CK：喷清水对照；KT：喷施 10 mg·L^{-1} 激动素；ETH：喷施 40 mg·L^{-1} 乙烯利。不同小写字母表示同一品种同一处理时期不同处理间在 0.05 水平差异显著。CK: spraying fresh water; KT: spraying 10 mg·L^{-1} kinetin; ETH: spraying 40 mg·L^{-1} ethephon. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments spraying at the same time for the same variety at 0.05 level.

2.5　植物生长调节剂对节间穿刺强度的影响

穿刺强度与倒伏率呈现极显著负相关[13]，穿刺强度越大抗倒伏能力越强。由图 5 表明，除‘德美亚 2 号’9 展叶期激动素处理外，两种调节剂处理均增加两个品种节间穿刺强度平均值。与对照相比，‘德美亚 1 号’喷施激动素后节间穿刺强度平均值 7 和 9 展叶期显著增加 17.68%和 16.82%，5 展叶期增加 8.26%。‘德美亚 2 号’5 展叶期喷施激动素后节间穿刺强度平均值比对照显著增加 14.97%，7 和 9 展叶期处理与对照无显著性差异。乙烯利喷施于‘德美亚 1 号’，5、7、9 展叶期处理节间穿刺强度分别比对照显著增加 13.12%、22.77%和 15.80%。与对照相比，乙烯利喷施于‘德美亚 2 号’5 和 9 展叶期处理节间穿刺强度平均值分别增加 9.00%和 9.02%，7 展叶期处理后第 3、4、5 节间穿刺强度分别比对照增加 11.34%、7.59%和 24.91%。7 展叶期喷施乙烯利对节间穿刺强度调控效果优于其他处理。

2.6　植物生长调节剂对茎秆半纤维素、纤维素和木质素的影响

半纤维素、纤维素使细胞壁有一定框架的同时富有弹性，木质素使细胞壁坚硬具有机械强度，其中纤维素既是初生细胞壁的主要成分又是次生细胞壁的主要成分。由图 6 可知，纤维素占化学组分的主要部分，木质素占比很小，除‘德美亚 1 号’9 展叶期乙烯利处理外，其他处理化学组分含量均比对照增加。激动素喷施于‘德美亚 1 号’，5、7、9 展叶期处理化学组分含量分别比对照增加 3.02%、4.65%和 5.29%，并与对照无显著性差异；喷施于‘德美亚 2 号’，5 和 9 个展叶期处理化学组分含量与对照增加 2.04%和 11.10%，7 展叶期处理增加 16.10%，其中半纤维素和纤维素含量比对照显著增加 15.69%和 20.22%。乙烯利喷施于‘德美亚 1 号’，5 展叶期处理化学组分含量比对照显著增加 8.82%，其中半纤维

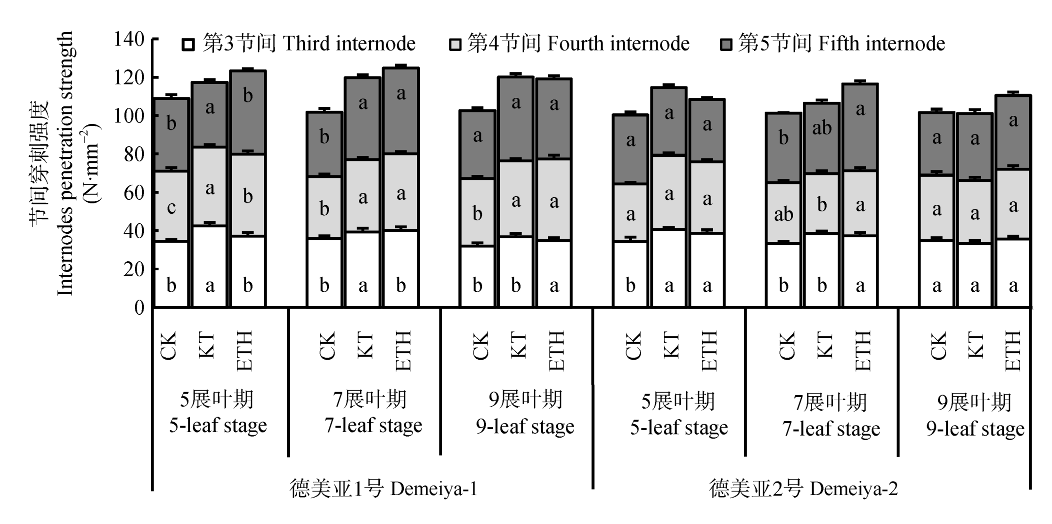


图 5　不同时期喷施植物生长调节剂对不同玉米品种籽粒灌浆期节间穿刺强度的影响

Fig. 5　Effects of plant growth regulators sprayed at different times on internode penetration strengths of different maize varieties at grain filling stage

CK: 喷清水对照; KT: 喷施 10 mg·L^{-1} 激动素; ETH: 喷施 40 mg·L^{-1} 乙烯利。不同小写字母表示同一品种同一处理时期不同处理间在 0.05 水平差异显著。CK: spraying fresh water; KT: spraying 10 mg·L^{-1} kinetin; ETH: spraying 40 mg·L^{-1} ethephon. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments spraying at the same time for the same variety at 0.05 level.

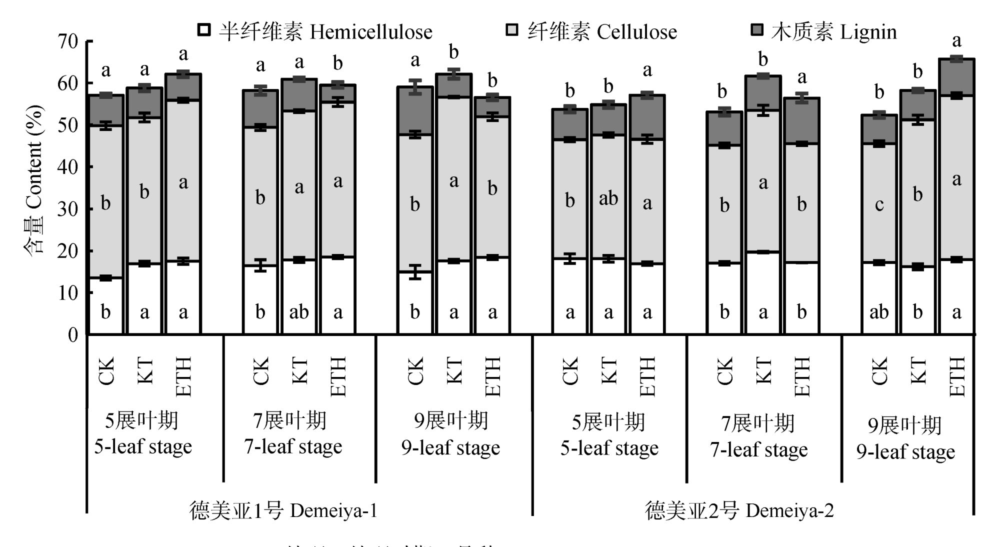


图 6　不同时期喷施植物生长调节剂对不同玉米品种籽粒灌浆期茎秆化学组分的影响

Fig. 6　Effects of plant growth regulators sprayed at different times on stem chemical materials contents of different maize varieties at grain filling stage

CK: 喷清水对照; KT: 喷施 10 mg·L^{-1} 激动素; ETH: 喷施 40 mg·L^{-1} 乙烯利。不同小写字母表示同一品种同一处理时期不同处理间在 0.05 水平差异显著。CK: spraying fresh water; KT: spraying 10 mg·L^{-1} kinetin; ETH: spraying 40 mg·L^{-1} ethephon. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments spraying at the same time for the same variety at 0.05 level.

素和纤维素含量分别比对照显著增加 29.33%和 5.72%, 7 和 9 展叶期处理化学组分含量与对照无显著性差异。‘德美亚 2 号’喷施乙烯利后, 9 展叶期处理化学组分含量比对照显著增加 25.49%, 其中纤维素和木质素含量分别比对照显著增加 37.85%和 27.33%。

2.7　倒伏相关性状与倒伏率的相关性分析

不同时期喷施植物生长调节剂均降低玉米倒伏率(表 1), 对照倒伏率均高于 11.25%, 处理倒伏率均低于 10%。激动素喷施于‘德美亚 1 号’, 9 展叶期处理倒伏率比对照降低 8.75%, 调控效果优于同品种其他处理。‘德美亚 2 号’7 展叶期喷施乙烯利后倒伏率比对照降低 10%。

从表 2 可以得出, 节间直径、节间穿刺强度和茎秆化学组分含量与倒伏率呈显著或极显著负相关。节间密度与节间折断力和穿刺强度相关系数为

表 1 不同时期喷施植物生长调节剂对不同玉米品种籽粒灌浆期倒伏率的影响
Table 1 Effects of plant growth regulators sprayed at different times on lodging rates of different maize varieties at grain filling stage %

处理 Treatment	德美亚 1 号 Demeiya-1			德美亚 2 号 Demeiya-2		
	5 展叶期 5-leaf stage	7 展叶期 7-leaf stage	9 展叶期 9-leaf stage	5 展叶期 5-leaf stage	7 展叶期 7-leaf stage	9 展叶期 9-leaf stage
CK	11.25	12.50	13.75	11.25	15.00	15.00
KT	7.50	6.25	5.00	8.75	7.50	8.75
ETH	6.25	5.00	8.75	7.50	5.00	8.75

CK: 喷清水对照; KT: 喷施 10 mg·L^{-1} 激动素; ETH: 喷施 40 mg·L^{-1} 乙烯利。CK: sparying fresh water; KT: sparying 10 mg·L^{-1} kinetin; ETH: sparying 40 mg·L^{-1} ethephon.

表 2 玉米倒伏性状与倒伏率相关性分析
Table 2 Correlation between lodging characters and lodging rate of maize

	长度 Length	直径 Diameter	密度 Density	折断力 Break strength	穿刺强度 Penetration strength	化学组分含量 Chemical material content
倒伏率 Lodging rate	0.328	–0.593**	–0.413	–0.443	–0.806**	–0.564*
长度 Length		–0.350	–0.473*	–0.312	–0.407	–0.141
直径 Diameter			0.459	0.905**	0.612**	0.455
密度 Density				0.156*	0.540*	0.397
折断力 Break strength					0.643**	0.315
穿刺强度 Penetration strength						0.445

*和**分别表示 5%和 1%水平相关。* and ** denote significant correlation at 5% and 1% levels, respectively.

0.156*和 0.540*，节间折断力与节间直径呈极显著正相关(0.905**)。说明降低节间长度，增加节间直径、密度、折断力、穿刺强度和化学组分均能降低玉米倒伏率。

2.8 植物生长调节剂对产量的影响

表 3 表明，‘德美亚 1 号’和‘德美亚 2 号’在 9 展叶期喷施激动素增产率最高达 22.24%和 19.98%，并达极显著水平；与对照相比，7 展叶期喷施激动素‘德美亚 1 号’极显著增产 19.90%和 16.02%，‘德美亚 2 号’极显著增产 16.02%，激动素 5 展叶期处理‘德美亚 1 号’和‘德美亚 2 号’产量比对照显著增加 17.29%和 11.25%。与对照相比，5、7、9 展叶期喷施乙烯利‘德美亚 1 号’增产 2.05%、5.26%和 4.67%，‘德美亚 2 号’增产 0.88%、4.64%和 9.44%，两个品种均未达显著差异。

表 3 不同时期喷施植物生长调节剂对不同玉米品种产量的影响
Table 3 Effects of plant growth regulators sprayed at different times on yield of different maize varieties

品种 Variety	处理 Treatment	5 展叶期 5-leaf stage		7 展叶期 7-leaf stage		9 展叶期 9-leaf stage	
		产量 Grain yield (kg·hm^{-2})	增产率 Increasing rate (%)	产量 Grain yield (kg·hm^{-2})	增产率 Increasing rate (%)	产量 Grain yield (kg·hm^{-2})	增产率 Increasing rate (%)
德美亚 1 号 Demeiya-1	CK	11 864.52±865.38Ab	—	11 929.31±273.53Bb	—	11 755.09±532.10Bb	
	KT	13 916.40±348.66Aa	17.29	14 303.76±265.77Aa	19.90	14 369.14±583.79Aa	22.24
	ETH	12 107.92±837.38Ab	2.05	12 556.29±889.54Bb	5.26	12 304.15±856.23Bb	4.67
德美亚 2 号 Demeiya-2	CK	14 175.52±876.85Ab		12 667.33±444.06Bb		13 204.43±511.23Bb	
	KT	15 770.68±525.19Aa	11.25	14 697.07±759.18Aa	16.02	15 843.29±888.38Aa	19.98
	ETH	14 300.11±892.31Ab	0.88	13 255.65±883.92ABb	4.64	14 451.17±842.24ABab	9.44

CK: 喷清水对照; KT: 喷施 10 mg·L^{-1} 激动素; ETH: 喷施 40 mg·L^{-1} 乙烯利。不同小、大写字母分别表同一品种同一处理时期不同处理间差异达 5%和 1%显著水平。CK: spraying fresh water; KT: spraying 10 mg·L^{-1} kinetin; ETH: spraying 40 mg·L^{-1} ethephon. Different lowercase and capital letters mean significant differences among treatments spraying at the same time for the same variety at 5% and 1% levels, respectively.

3 结论与讨论

利用植物生长调节剂调控玉米基部节间长度、直径、密度、折断力、穿刺强度和化学组分，以提高玉米抗倒伏能力是当今常用的栽培技术手段。喷施乙烯利可以降低作物基部节间长度。本试验研究表明，‘德美亚 1 号’和‘德美亚 2 号’两个品种 7 展叶期喷施乙烯利，可以显著缩短基部节间总长度，并

显著增加茎粗，这与前人的研究结果基本一致。卫晓轶等[20]在多个基因型玉米喷施乙烯利后降低基部第 1~6 节节间长度；Ye 等[21]利用乙烯利和氮肥梯度处理玉米，发现乙烯利显著缩短第 7~14 节节间长度，增加节间直径。本试验发现，激动素对节间长度影响不显著，既未缩短节间长度也未增加节间长度。试验发现，'德美亚 1 号' 5 展叶期喷施激动素和'德美亚 2 号' 7 展叶期喷施乙烯利对节间直径的调控效果优于同品种其他处理，这可能是相同浓度调节剂处理时期不同导致的结果不同，体现了植物生长调节剂的时效性。试验中激动素和乙烯利对玉米节间直径影响与前人研究基本一致，李小艳等[18]在玉米抽雄期喷施细胞分裂素后节间直径增加。关于调节剂对节间密度影响，本研究发现，不同展叶期喷施激动素均增加玉米节间密度，但 5 展叶期喷施乙烯利与对照差异不显著。Dourado 等[22]研究表明，用激动素浸泡玉米种子后可以增加植株总干物质积累。本研究发现，'德美亚 1 号' 7 展叶期喷施乙烯利和'德美亚 2 号' 5、7 展叶期喷施激动素对节间密度调控效果优于同品种其他处理。本试验倒伏农艺性状相关分析表明倒伏率与节间直径极显著负相关，节间长度对倒伏有正效应，节间密度对倒伏率有负效应。综合上述研究结果和相关性分析表明，植物生长调节剂对玉米农艺性状影响最优时期为：'德美亚 1 号' 5 展叶期喷施激动素，'德美亚 2 号' 7 展叶期喷施乙烯利。

关于激动素和乙烯利对节间折断力影响，本试验发现，5、7 展叶期喷施激动素显著增加'德美亚 1 号'基部第 3、4、5 节节间折断力，但对'德美亚 2 号'与'德美亚 1 号'表现不一致，对'德美亚 2 号'调控能力较弱。前人研究表明，激动素虽然发现了 40 多年，但未实现稳定的商业化，主要原因是其影响因素复杂[23]。本试验表明，对节间折断力，'德美亚 1 号' 5 展叶期喷施激动素调控效果优于同品种其他处理，'德美亚 2 号' 7 展叶期喷施乙烯利调控效果优于同品种其他处理。从相关性分析发现，节间直径与节间折断力极显著正相关，这与勾玲等[13]在群体密度对玉米抗倒伏力学影响研究结果一致。两种调节剂对节间穿刺强度的影响，本试验发现，'德美亚 2 号' 5 展叶期喷施激动素和'德美亚 1 号' 7 展叶期喷施乙烯利调控效果较好，节间穿刺强度与倒伏呈现极显著负相关。综合节间力学和相关性分析表明，激动素施用时期需要根据具体品种而定，乙烯利最适时期为 7 展叶期喷施两个品种。

化学组分中半纤维素、纤维素和木质素是组成细胞骨架的必须物质。本试验研究发现，化学组分与倒伏显著负相关，激动素在 3 个展叶期处理对'德美亚 1 号'化学组分含量影响依次为：5 展叶期<7 展叶期<9 展叶期，这与产量表现一致，随着展叶期的延后产量增加幅度越大。激动素喷施于'德美亚 2 号'，7、9 展叶期处理化学组分比对照显著增加，同时 7、9 展叶期处理产量与对照达极显著水平。'德美亚 2 号'9 展叶期喷施乙烯利，化学组分比对照显著增加，同时，本试验研究也发现乙烯利对产量增加不显著，这由于单株穗重减少，但单位面积株数比对照增加，结果与前人研究基本一致[24]。

本试验只是对玉米灌浆期基部节间形态、力学和化学组分进行分析研究，由于调节剂专一性和时效性，同时调节剂还有'反跳'现象等，要系统了解激动素和乙烯利对玉米影响，需要进行多种相关酶和激素的深层调控机理研究。

参考文献 References

[1] 程富丽，杜雄，刘梦星，等. 玉米倒伏及其对产量的影响[J]. 玉米科学, 2011, 19(1): 105–108
Cheng F L, Du X, Liu M X, et al. Lodging of summer maize and the effects on grain yield[J]. Journal of Maize Sciences, 2011, 19(1): 105–108

[2] 曹庆军，曹铁华，杨粉团，等. 灌浆期风灾倒伏对玉米籽粒灌浆特性及品质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(9): 1107–1113
Cao Q J, Cao T H, Yang F T, et al. Effect of wind damage on grain-filling characteristics, grain quality and yield of spring maize (*Zea mays* L.)[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(9): 1107–1113

[3] 李树岩，马玮，彭记永，等. 大喇叭口及灌浆期倒伏对夏玉米产量损失的研究[J]. 中国农业科学, 2015, 48(19): 3952–3964
Li S Y, Ma W, Peng J Y, et al. Study on yield loss of summer maize due to lodging at the big flare stage and grain filling stage[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(19): 3952–3964

[4] 卜俊周，岳海旺，谢俊良，等. 倒伏对玉米籽粒灌浆进度及产量的影响[J]. 河北农业科学, 2010, 14(6): 1–2
Bu J Z, Yue H W, Xie J L, et al. Effects of lodging on filling speed and yield of maize[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2010, 14(6): 1–2

[5] 段鹏，郑苗，王中，等. 倒折倒伏与夏玉米主要农艺性状及产量的相关性研究[J]. 甘肃农业科技, 2008, (12): 13–15
Duan P, Zheng M, Wang Z, et al. Correlation of lodging and folding on the agronomic characters and yield of summer maize[J]. Gansu Agricultural Science and Technology, 2008, (12): 13–15

[6] Koinuma K, Ikegaya F, Ito E. Heterotic effects for root lodging resistance in F_1 hybrids among dent and flint inbred lines of silage maize[J]. Maydica, 1998, 43(1): 13–17

[7] 宋朝玉, 张继余, 张清霞, 等. 玉米倒伏的类型、原因及预防、治理措施[J]. 作物杂志, 2006, (1): 36–38
Song C Y, Zhang J Y, Zhang Q X, et al. Corn type of lodging cause and the prevention measures[J]. Crops, 2006, (1): 36–38
[8] 王云奇, 李金鹏, 王志敏, 等. 12 叶展倒伏对夏玉米籽粒灌浆特性和产量的影响[J]. 玉米科学, 2016, 24(4): 90–97
Wang Y Q, Li J P, Wang Z M, et al. Effects of lodging at v12 stage on the characters of grain filling and yield of summer maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2016, 24(4): 90–97
[9] 丰光, 景希强, 李妍妍, 等. 玉米茎秆性状与倒伏性的相关和通径分析[J]. 华北农学报, 2010, 25(S1): 72–74
Feng G, Jing X Q, Li Y Y, et al. Correlation and path analysis of lodging resistance with maize stem characters[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2010, 25(S1): 72–74
[10] Martin M J, Russell W A. Correlated responses of yield and other agronomic traits to recurrent selection for stalk quality in a maize synthetic[J]. Crop Science, 1984, 24(4): 746–750
[11] 姚敏娜, 施志国, 薛军, 等. 种植密度对玉米茎秆皮层结构及抗倒伏能力的影响[J]. 新疆农业科学, 2013, 50(11): 2006–2014
Yao M N, Shi Z G, Xue J, et al. The effects of different planting densities on the cortex structure of steam and lodging resistance in maize[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2013, 50(11): 2006–2014
[12] 刘卫星, 王晨阳, 王强, 等. 不同玉米品种茎秆抗倒特性及其与产量的关系[J]. 河南农业科学, 2015, 44(7): 17–21
Liu W X, Wang C Y, Wang Q, et al. Stalk lodging-resistance property and its correlation with yield among different maize varieties[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2015, 44(7): 17–21
[13] 勾玲, 黄建军, 张宾, 等. 群体密度对玉米茎秆抗倒力学和农艺性状的影响[J]. 作物学报, 2007, 33(10): 1688–1695
Gou L, Huang J J, Zhang B, et al. Effects of population density on stalk lodging resistant mechanism and agronomic characteristics of maize[J]. Acta Agronomica Sinica, 2007, 33(10): 1688–1695
[14] Wang T J, Zhang L, Han Q, et al. Effects of stalk cell wall and tissue on the compressive strength of maize[J]. Plant Science Journal, 2015, 33(1): 109–115
[15] 卫晓轶, 张学舜, 魏锋, 等. 激素对细胞伸长生长的调控综述[J]. 现代农业科技, 2012, (21): 166–167
Wei X Y, Zhang X S, Wei F, et al. Review of hormone on regulation of cell elongation[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2012, (21): 166–167
[16] 李建军, 靳海蕾, 王昌亮, 等. 化学调控剂对玉米农艺性状及产量的影响[J]. 山西农业科学, 2016, 44(4): 483–486
Li J J, Jin H L, Wang C L, et al. Effect of chemical regulation agent on agronomic traits and yield of maize[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2016, 44(4): 483–486
[17] 程永钢, 段宏凯, 闫建宾, 等. 不同玉米品种在不同化控剂作用下产量的差异分析[J]. 中国农学通报, 2016, 32(9): 47–51
Cheng Y G, Duan H K, Yan J B, et al. Effect of chemical regulators on yield characteristics of different maize cultivars[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(9): 47–51
[18] 李小艳, 许晅, 朱同生, 等. 细胞分裂素对玉米产量性状的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(36): 219–223
Li X Y, Xu X, Zhu T S, et al. Effects of exogenous cytokinin on maize yield characteristics[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(36): 219–223
[19] 马飞前, 刘小刚, 王红武, 等. 玉米茎秆纤维品质性状及其相关分析[J]. 作物杂志, 2014, (4): 44–48
Ma F Q, Liu X G, Wang H W, et al. Stalk fiber quality traits and their correlations in maize[J]. Crops, 2014, (4): 44–48
[20] 卫晓轶, 张明才, 李召虎, 等. 不同基因型玉米对乙烯利调控反应敏感性的差异[J]. 作物学报, 2011, 37(10): 1819–1827
Wei X Y, Zhang M C, Li Z H, et al. Differences in responding sensitivity to ethephon among different maize Genotypes[J]. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37(10): 1819–1827
[21] Ye D L, Zhang Y S, Al-Kaisi M M, et al. Ethephon improved stalk strength associated with summer maize adaptations to environments differing in nitrogen availability in the North China Plain[J]. The Journal of Agricultural Science, 2016, 154(6): 960–977
[22] Dourado-Neto D, Martin T N, Pavinato P S, et al. Maize seed treatment with micronutrients increases grain yield[J]. Revista Caatinga, 2015, 28(3): 86–92
[23] Koprna R, De Diego N, Dundálková L, et al. Use of cytokinins as agrochemicals[J]. Bioorganic & Medicinal Chemistry, 2016, 24(3): 484–492
[24] Ramburan S, Greenfield P L. Use of ethephon and chlormequat chloride to manage plant height and lodging of irrigated barley (cv. Puma) when high rates of N-fertiliser are applied[J]. South African Journal of Plant and Soil, 2007, 24(4): 181–187